

Lukáš ĎURIŠ<sup>1</sup>, Josef ALDORF<sup>2</sup>, Marek MOHYLA<sup>3</sup>

## MODELOVÁNÍ CHOVÁNÍ TUHÉHO PRVKU V PRIMÁRNÍM OSTĚNÍ

### BEHAVIOR MODELING OF THE SOLID ELEMENT IN PRIMARY LINING

#### Abstrakt

Ražení podzemních děl je obecně spojeno s velkým množstvím rizik a problémů při samotné realizaci díla. Tyto rizika se snažíme minimalizovat vhodným přístupem a řešením. Nejrozšířenější metodou pro zajištění výrubu je použití stříkaného betonu. Samotný stříkaný beton nestačí a proto je potřeba ho vyztužit ocelovou výztuží. Pro vyztužení můžeme využít jak příhradové nosníky tak i například válcované profily. Změna tuhosti a deformací výztuže s tuhými nosníky bude předmětem článku.

#### Klíčová slova

Primární ostění, ocelový nosník.

#### Abstract

Underground works excavation is generally associated with a large number of risks and problems in the actual implementation of the work. They we try to minimize the risk of an appropriate approach and solution. The most widely used method for excavation support is the use of sprayed concrete. Sprayed concrete itself is not enough and therefore it needs to be reinforced with steel reinforcement. The reinforcement can be used as lattice girders or steel ribs. Changing the stiffness and deformation with rigid reinforcement beams will be subject of the paper.

#### Keywords

Primary lining, steel rib.

## 1 ÚVOD

Pro primární vyztužení tunelů prováděných NRTM se používá stříkaný beton vyztužený ocelovými prvky. Základní vstupní veličinou pro matematické modelování primárního ostění je stanovení ohybové a normálové tuhosti ostění, což zejména u průřezu vyztužených tuhými válcovanými prvky (v současnosti např. tunel Jablunkov a dokončený tunel Dobrovského) může výrazně zkomplikovat řešení (další v [3],[4],[6],[7],[8]). Pro nahrazení takového vyztuženého průřezu průřezem homogenním je používána teorie ocelobetonu, kde homogenizace průřezu je prováděna podle vztahů [2]  $b_{ci} = (b_c \cdot E_c) / E_s$  a  $A_{ci} = b_{ci} \cdot h_c$  převádějících problém homogenizace na

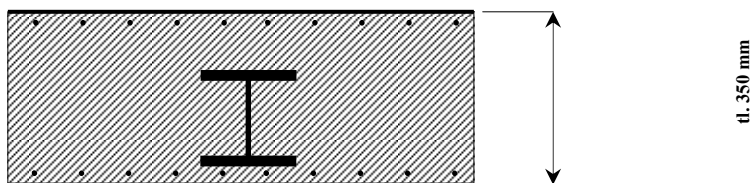
---

<sup>1</sup> Ing. Lukáš Ďuriš, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 948, e-mail: lukas.duris@vsb.cz.

<sup>2</sup> Prof. Ing. Josef Aldorf, DrSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 944, e-mail: josef.aldorf@vsb.cz.

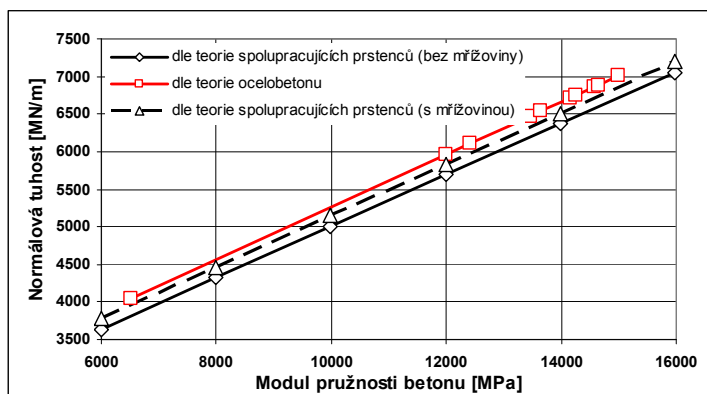
<sup>3</sup> Ing. Marek Mohyla, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 948, e-mail: marek.mohyla@vsb.cz.

stejnorodý průřez s modulem pružnosti  $E_s$ , ze kterého jsou dále počítány průřezové veličiny  $J_x$  a další. Betonová část průřezu se redukuje v poměru  $E_c/E_s$ , což v zásadě definuje „spolupracující šířku“ betonové desky  $b_{ci}$  (ve smyslu spolupracující šířky  $T$  průřezu betonových trámů). Tento postup zejména u časově závislých modulů pružnosti betonu vede k potřebě opakování výpočtu s jinou hodnotou  $b_{ci}$ . V příspěvku [5] byl předložen alternativní přístup, využívající teorii nehomogenních spolupracujících prstenců podle Fotieové [1] homogenizující průřez ve vztahu k modulu pružnosti betonu. Tímto postupem byly v [5] stanoveny parametry např. ohybové a normálové tuhosti. Výsledek výpočtu normálové tuhosti je uveden na obrázku č. 2 a platí pro průřez ostění uvedený na obrázku č. 1.



beton SB 25. mřížovina 6x6x100.

Obr. 1: Primární ostění tunelu Dobrovského

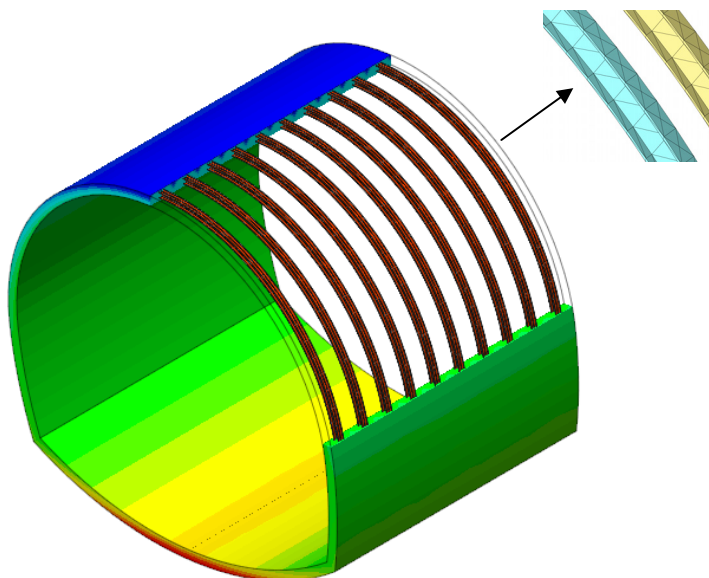


Obr. 2: Normálová tuhost s využitím homogenizovaného průřezu dle Fotieové pro průřez na obr. 1

Rozdíl tuhostí stanovených alternativním přístupem je menší než 3 %, což vyhovuje požadavkům na relevantnost statického řešení.

Účelem a cílem tohoto příspěvku je studium chování ostění vyztuženého tuhými profily (v našem případě HEB 200), stanovení reálné „spolupracující“ šířky betonové části průřezu a reálné rozdělení napětí v HEB i v betonové části průřezu. K tomuto cíli byl vytvořen prostorový model ostění s celkem 10 ks nosníků HEB 200 s roztečí 1,0 m (obr. 3) v podmínkách homogenního horninového prostředí. Toto prostředí odpovídá svým vlastnostem například místu vzniku havárie tunelu Jablunkov. Tyto podmínky byly voleny záměrně, vzhledem k obvyklému využití těchto válcovaných nosníků v geologicky obtížných podmínkách. Parametry horninového prostředí jsou uvedeny v tabulce č. 1. 3D model byl řešen s využitím programového systému Midas GTS v režimu pružnoplastického chování horninového prostředí.

Zvolený programový systém umožňuje poměrně detailně namodelovat příslušnou situaci. Velkou výhodou je možnost kontroly hustoty sítě konečných prvků pro jednotlivé prvky. Celý model obsahoval celkem přes 391 000 elementů a 70 800 uzlů. Hustota sítě dokáže velmi významně ovlivnit výsledky. Tvar primárního ostění je uveden na obrázku č. 3 včetně válcovaných nosníků.



Obr. 3: Schéma 3D modelu ostění

Tab. 1: Vstupní parametry modelu 3D

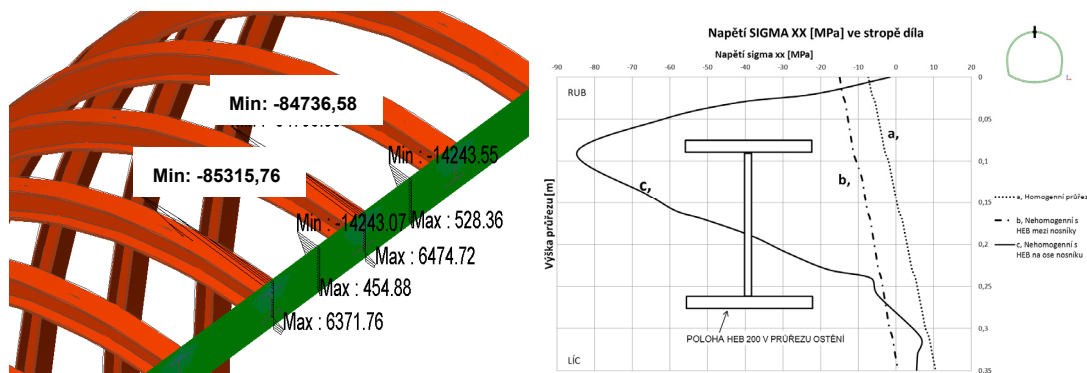
	Model	$\gamma$ [kN.m <sup>-3</sup> ]	E [MPa]	$\nu$ [-]	c [kPa]	$\phi$ [°]
Hornina	M/C	21	10	0,35	10	22
Beton	Elastic	24	20 000	0,2	-	-
Ocel	Elastic	80	210 000	0,2	-	-

## 2 VÝSLEDKY ŘEŠENÍ OSTĚNÍ A JEJICH STRUČNÁ INTERPRETACE

Vložení velmi tuhého ocelového prvku do vrstvy betonu s přibližně 10× nižším modulem pružnosti se nutně projeví v poněkud modifikovaném chování celého ostění, ve kterém může docházet k relativním posunům opačného znaménka v ocelovém průřezu a v betonu (viz obr. č. 7), které mohou vést ke vzniku tahových trhlin na kontaktu přírub tuhého prvku a vrstvy betonu. Eliminaci tohoto nebezpečí musí zajistit vložená mřížovina na rubu i líci ostění. Vložení tuhého prvku také podstatně změní průběh normálového napětí v celém průřezu.

### 2.1 Rozdělení napětí v průřezu ostění s HEB 200

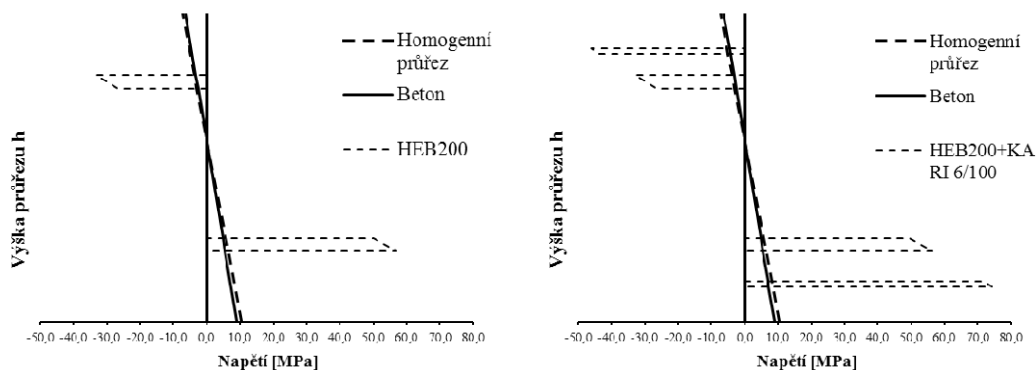
Vyhodnocení normálového napětí v průřezu ukazuje (obrázky č. 4) výraznou nelinearitu s maximem v oblasti horní (rubové) příruby (obrázky č. 4 čára c) ve srovnání s klasickým lineárním rozdělením, které je typické jak pro homogenizovaný průřez (obrázky č. 4 čára a), tak pro homogenní betonový průřez mezi HEB (obrázky č. 4 čára b).



Obr. 4: Průběhy normálových napětí po výšce průřezu

Ve srovnání s průběhem napětí s homogenizovaným průřezem po jeho přepočtu (obr. 5) je zřejmé, že 3D řešení dává poněkud příznivější výsledek, pokud jde o velikost tahového napětí v betonu na lici ostění (zejména mezi HEB - obr. 4b), naopak tlakové napětí v oceli horní příruby je cca 2x vyšší (obr. 4c) a prakticky eliminuje velikost tlakového napětí v betonu na zanedbatelnou hodnotu. Z hlediska velikosti vzniklých napětí v oceli je průřez na cca max. 40 % své únosnosti, z hlediska namáhání betonu mezi HEB na cca 50 %. Tento výsledek potvrzuje, že návrh ostění např. tunelu Jablunkov je dostatečně spolehlivý i pro nejméně příznivé horninové poměry a má dostatečnou rezervu únosnosti.

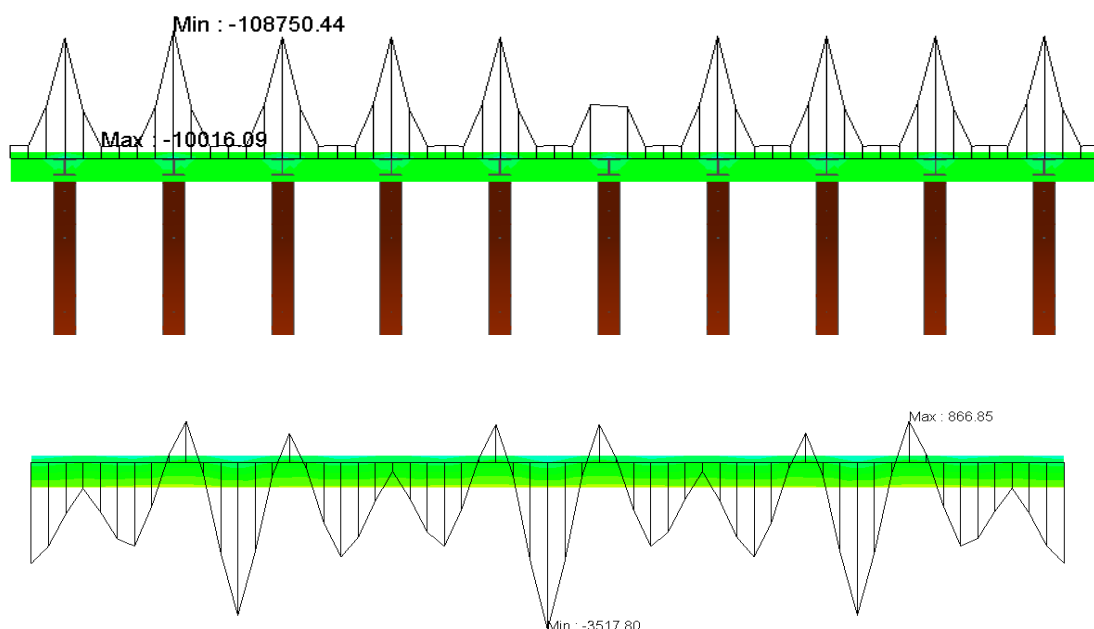
Rozdělení napětí v homogenizovaném průřezu ukazuje obr. 5, kde je uvažováno s použitím KARI sítě 6/100. V řešení 3D nebyly síť uvažovány s ohledem na velikost úlohy a mimořádné nároky na výpočet.



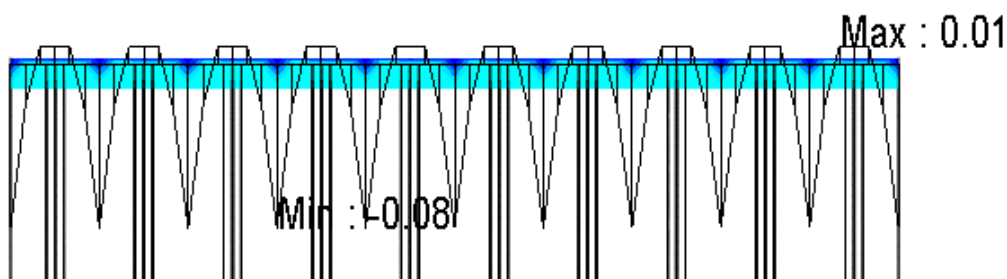
Obr. 5: Průběh napětí pro homogenizovaný průřez

## 2.2 Spolupůsobící šířka betonového průřezu

Z průběhu normálových ( $\sigma_{xx}$ ), a tangenciálních napětí ( $\sigma_{yy}$ ) po délce průřezu (obr. 6) i z průběhu přetvoření ostění po délce (obr. 7) je zřejmé, že v ostění dochází ke vzniku spolupůsobení části betonového průřezu s tuhým ocelovým prvkem HEB, obdobně jako je uvažováno v řešení tzv. T průřezu trámu s deskou, kde je spolupůsobící šířka desky stanovována z šířky trámu, rozpětí a rozteče trámů.



Obr. 6: Průběh napětí  $\sigma_{xx}$  a  $\sigma_{yy}$  po délce ostění



Obr. 7: Průběh svislých posunů po délce ostění

Z obr. č. 6 a č. 7 lze s velkou pravděpodobností dedukovat, že použití tuhých nosníků (HEB) v primárním ostění umožňuje uvažovat, že spolupůsobící šířka  $b_{ci}$  betonového průřezu s ocelovým prvkem má rozměr cca  $b_{ci} = 2,5 - 3 B$ , kde  $B$  je šířka příruby ocelového prvku, což neodpovídá šířce  $b_{ci} = (b/E_s) \cdot E_b$  (podle teorie ocelobetonu), která je výrazně menší. Pro šířku příruby cca 200 mm činí  $b_{ci} =$  cca 0,5 - 0,6 m, což může znamenat výrazné zvýšení únosnosti ostění.

### 3 SHRUTÍ A ZÁVĚRY

Simulované 3D řešení ostění vyztuženého tuhými prvky umožnilo provést pokus o zobecnění a formulovat předběžná doporučení pro statická řešení tohoto typu ostění:

- pro stanovení ohybové a normálové tuhosti je vhodné aplikovat teorii spolupůsobících prstenců, která dává dostatečně spolehlivé výsledky ve srovnání s postupem z teorie ocelobetonu (nehomogenních nosníků);
- pro výpočet únosnosti ostění doporučujeme uvažovat se spolupůsobící šířkou betonového průřezu  $b_{ci} = (2,5-3)B$  ( $B$  = šířka příruby tuhého prvku) a pro stanovení tuhosti tohoto prstence využít postup ad a);

- c) ke stanovení rozdělení napětí v průřezu ostění je možno rovněž využít teorii spolupracujících prstenců s tím, že výsledek je částečně v rozporu se skutečným rozdělením napětí v průřezu. Hodnoty reálných napětí v ocelovém průřezu jsou v tláčené oblasti cca o 30-40 % vyšší, v oblasti tahových napětí v oceli je tomu naopak;
- d) aplikace tuhých prvků o primárním ostění bez použití mřížoviny na rubu i lici prvku by vedla k porušování betonu na kontaktu přírub a betonu a jeho možnému opadávání.

## PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl vypracován s finanční podporou specifického vysokoškolského výzkumu pro rok 2012 s názvem projektu Analýza spolupráce a vlivu tuhého ocelového prvku v primárním ostění tunelů vedeným pod číslem SP2012/133.

## LITERATURA

- [1] BULYČEV, N. S. *Mechanika podzemnych sooruzenij*. NEDRA, Moskva 1982
- [2] ŠMIŘÁK, S. *Pružnost a plasticita I: pro distanční studium*. Vyd. 3., V Akademickém nakl. CERM 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 210 s. ISBN 80-720-4468-0.
- [3] PECHMAN, J. a kol. *Statický výpočet primárního ostění tunelu Dobrovského*. Amberg Engineering, Brno 2007
- [4] ALDORF, J. *Mechanika podzemních konstrukcí*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1999, 410 s. ISBN 80-707-8695-7.
- [5] ALDORF, J. HRUBEŠOVÁ, E., VOJTASÍK, K., ĎURIŠ, L. Alternativní způsob stanovení tuhosti betonového ostění vyztuženého válcovanými prvky. *Sborník 3. konference Beton v podzemních a základových konstrukcích*, ČBS Praha 2008
- [6] BROX, D. a HAGEDORN, H., Extreme deformation and damage during the construction of large tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1999, roč. 14, č. 1, s. 23-28. ISSN 08867798. DOI: 10.1016/S0886-7798(99)00010-3.
- [7] DALGIÇ, S., Tunneling in squeezing rock, the Bolu tunnel, Anatolian Motorway, Turkey. *Engineering Geology*. 2002, roč. 67, 1-2, s. 73-96. ISSN 00137952. DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00146-1.
- [8] ORESTE, P. P., Analysis of structural interaction in tunnels using the convergence-confinement approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2003, roč. 18, č. 4, s. 347-363. ISSN 08867798. DOI: 10.1016/S0886-7798(03)00004-X.

## Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Dr. Ing. Jan Pruška, Katedra geotechniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze.

Ing. Pechman Jiří, Amberg Engineering Brno a.s., Brno.